Le Toarcien inférieur des régions de Bascharage et de Bettembourg (grand-duché du Luxembourg) : évidences paléontologiques et sédimentologiques d'environnements restreints proches de l'émersion

Michel HENROTAY* & Dalia MARQUES
8 rue de Bouny, B-4624 Romsée (Belgique)
* Laboratoire d'Entomologie fondamentale et appliquée, Muséum national d'Histoire naturelle,
45 rue de Buffon, F-75231 Paris cedex 05 (France)

Jean-Claude PAICHELER
Laboratoire de Dynamique des bassins sédimentaires,
université de Reims Champagne-Ardenne, UFR Sciences,
BP 347, F-51062 Reims cedex (France)

Jean-Claude GALL
Laboratoire de Paléontologie et de Sédimentologie, université Louis-Pasteur de Strasbourg,
Institut de Géologie, 1 rue Bleissig, F-67084 Strasbourg cedex (France)

André NEL
Laboratoire d'Entomologie fondamentale et appliquée, Muséum national d'Histoire naturelle,
45 rue de Buffon, F-75231 Paris cedex 05 (France)

Henrotay M., Marques D., Paicheler J.-C., Gall J.-C. & Nel A. 1998. — Le Toarcien inférieur des régions de Bascharage et de Bettembourg (grand-duché du Luxembourg) : évidences paléontologiques et sédimentologiques d'environnements restreints proches de l'émersion. *Geodiversitas* 20 (2) : 263-284.

MOTS CLÉS
Lias,
Toarcien inférieur,
Luxembourg,
faune,
flore,
stratigraphie,
taphonomie,
paléoenvironnement.

RÉSUMÉ
Le paléoenvironnement du « *Konservat-Lagerstätten* » à insectes fossiles du Toarcien inférieur de Bascharage (Luxembourg) est reconstruit à partir de l'analyse de sa stratigraphie et de sa faune. Il correspond à un bref épisode d'émersion au cours du processus de comblement d'un fond de golfe.

KEY WORDS
Lias,
Lower Toarcian,
Luxembourg,
fauna,
flora,
stratigraphy,
taphonomy,
palaeoenvironment.

ABSTRACT
The lower Toarcian of Bascharage and Bettembourg (Great Duchy of Luxembourg) : palaeontologic and sedimentologic evidences of restricted environments near emersion. A reconstruction of the palaeoenvironment of the insects "*Konservat-Lagerstätten*" from the lower Toarcian of Bascharage (Luxembourg) is proposed after the analysis of the stratigraphy and the fauna. It corresponds to an emersion episode during the process of filling of a bay.

INTRODUCTION

Le Toarcien inférieur du grand-duché du Luxembourg a fait l'objet de récoltes paléontologiques menées par deux d'entre nous (M. H. & D. M.) entre 1980 et 1994 à l'occasion du creusement des fondations de deux usines (Luxgard I et TDK) sur le site industriel de Bommelscheuer, à Bascharage (Fig. 1). Ces recherches se sont élargies à la région de Bettembourg (implantation de l'unité Luxgard II) située à 15 km à l'est de Bascharage. D'autres gisements ont également été visités, en particulier à Sanem (construction d'un viaduc), à 2,5 km au sud-est de Bascharage et dans les environs immédiats de Bettembourg (échangeur autoroutier) et de Esch-sur-Alzette.

Une importante faune d'invertébrés et de vertébrés marins qui associe lamellibranches, ammonites, actinoptérygiens, ichthyosaures et crocodiliens à des organismes terrestres parfois très abondants (insectes, fragments possibles de ptérosauriens, plantes, débris ligneux) a été inventoriée.

Cette variété d'organismes aux milieux de vie très contrastés pose la question de la genèse de leurs gisements car il est exceptionnel que soient préservés ensemble des insectes terrestres et des vertébrés marins. De par cette particularité, les gisements de Bascharage et de Bettembourg se différencient nettement des « schistes à posidonies » du Toarcien inférieur d'Holzmaden-Ohmden (Allemagne) qui, très riches en organismes marins parfaitement conservés, n'ont pas livré d'insectes (Gall 1979), à l'exception de quelques individus observés dans les schistes à posidonies de Bavière (R. Wild com. orale, 1993). Ils offrent par contre certaines analogies avec les gisements du Toarcien inférieur du Yorkshire (Angleterre) étudiés par Hallam (1967) et de Kerkhofen-Oberpfalz en Bavière (Brachert 1987) qui ont livré une riche entomofaune.

Les calcaires lithographiques du Jurassique supérieur de Bavière (Solnhofen, Eischtätt) en Allemagne sont l'un des exemples les plus célèbres d'un tel mélange faunique. Leur genèse reste controversée (Barthel *et al.* 1990 ; Viohl 1990, 1992), bien qu'une majorité d'auteurs s'entende pour les considérer comme un dépôt de bassins développés en arrière d'un récif de spongiaires, à proximité de terres émergées d'où provenaient les organismes terrestres tels les *Archaeopteryx* et les insectes. Il est admis que les écosystèmes microbiens ont joué un rôle essentiel dans la genèse de ces gisements (Keupp 1977 ; Allison 1988 ; Wollanke & Zimmerle 1990), mais il faut savoir que les processus taphonomiques à l'origine des gisements à insectes sont peu connus, car insuffisamment étudiés.

LES SÉRIES DE BASCHARAGE ET DE BETTEMBOURG : ASPECTS SÉDIMENTOLOGIQUES ET PALÉONTOLOGIQUES

Les séries sédimentaires de Bascharage et de Bettembourg sont essentiellemenr consrituées de laminites (« schistes carton »). Seuls deux niveaux à nodules calcaires situés à la base de la série et un horizon à lentilles calcaires localisées dans la partie supérieure (Fig. 2, horizons Nod. 1, Nod. 2 et Lent.) interrompent la monotonie de cette sédimentation. Des dépôts du même type ont été fréquemment signalés dans les marnes noires de la série liasique du Dorset en Angleterre (Lang & Spath 1926). Les nodules sont riches en gros vertébrés marins (poissons, ichtyosaures, crocodiliens, etc.) alors que les lentilles recèlent un mélange d'organismes marins (actinopterygiens, « reptiles », crustacés, pontes et premiers stades de céphalopodes) et terrestres (végétaux et insectes à Bascharage, végétaux uniquement à Bettembourg). L'identité lithologique de ces différents repères permet de corréler correctement les séries (Fig. 2).

LA SÉRIE DE BASCHARAGE
(sites de « Luxgard I » et « TDK »)

Le membre inférieur (les marnes bleues à *Dactylioceras*)

D'une puissance totale de 6,5 m, la série toarcienne de Bascharage débute par un niveau de marnes bleues silteuses (1,5 m) à *Dactyloceras semicelatum* et *Dactylioceras tenuicostatum*. Ces

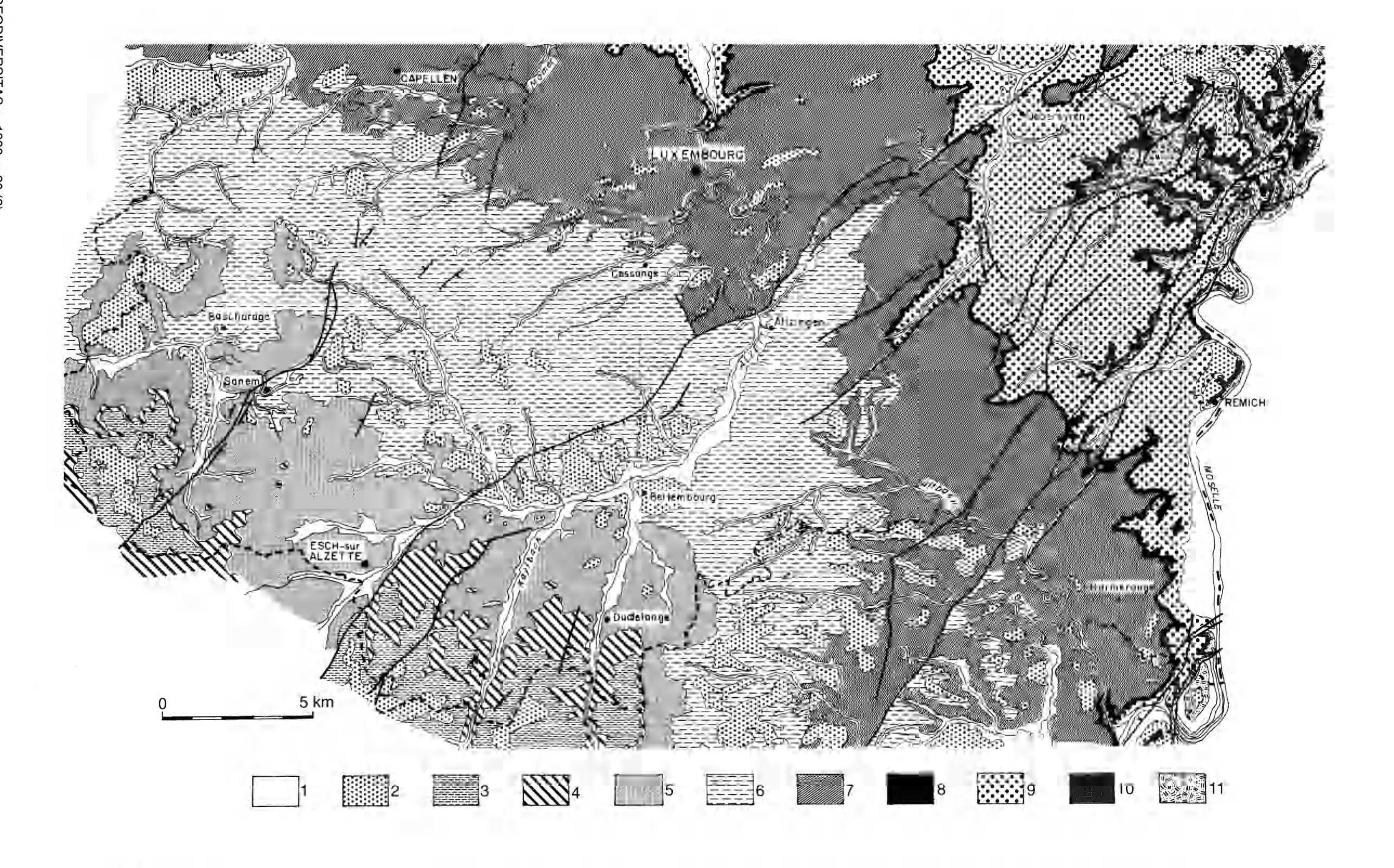


FIG. 1. — Carte géologique du grand-duché du Luxembourg. **1**, Holocène ; **2**, Néogène ; **3**, Bajocien ; **4**, Aalénien ; **5**, Toarcien ; **6**, Pliensbachien ; **7**, Sinémurien ; **8**, Rhétien ; **9**, Keuper gypsifère ; **10**, groupe de la Lettenkohle ; **11**, Muschelkalk.

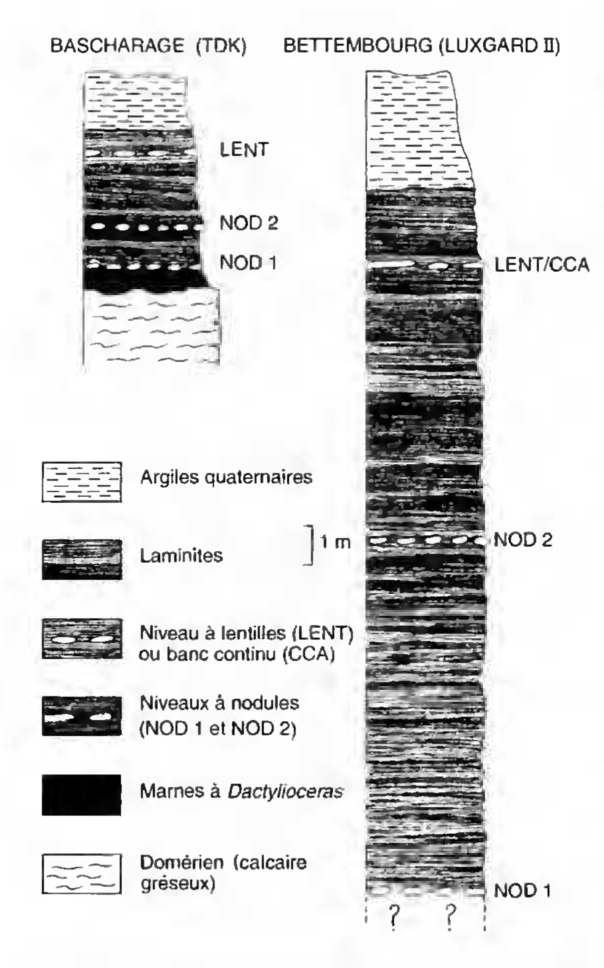


FIG. 2. — Profils lithologiques du Toarcien inférieur à Bascharage (site de TDK) et à Bettembourg (site de Luxgard II).

marnes sont riches en concrétions millimétriques de pyrite mêlées à des nodules calcaires de 1 à 4 cm contenant des macrotestes de céphalopodes (bélemnites et ammonites). La pyrite peut constituer plus de 20 % de la roche.

La faune des marnes comporte de nombreux organismes benthiques (crinoïdes, échinidés, lamellibranches, gastéropodes, vers, crustacés), quelques formes juvéniles de céphalopodes (bélemnites ou ammonites) et des fragments de « poissons » (vertèbres, écailles, dents).

Les nodules calcaires sont composés d'une micrite homogène contenant des débris d'algues chlorophycées associés à des fragments de lamellibranches (posidonies ?) et de gastéropodes. Ils ne présentent aucune structuration particulière et la pyrite y est peu développée. Leur formation semble liée à une concentration de carbonate autour d'un nucléus constitué par un teste de macro-organisme (ammonite, bélemnite).

L'ensemble du dépôt traduit de toute évidence un milieu de vie bien oxygéné favorable au développement d'un épibenthos, *malgré la présence de pyrite qui suggère plutôt un milieu réducteur.*

LE MEMBRE SUPÉRIEUR

Les laminites

Les laminites (= « schistes carton » = « schistes bitumineux » = « schistes à posidonies » de la littérature) représentent une sédimentation particulièrement monotone et ne montrent ni bancs calcaires continus comme à Holtzmaden (Gall 1979) ni horizons phosphatés comme dans le Toarcien inférieur du Centre-Ouest de la France (Gabilly 1976). Formant le corps principal de la série avec une puissance d'environ 5 m, elles sont constituées d'un empilement de séquences inframillimétriques à deux termes : lamine claire et lamine sombre. Le terme clair est composé d'une « poussière » de quartz associée à une faible proportion de calcite diagénétique, le terme sombre de matière organique peu oxydée, mouchetée de pyrite. Cet agencement en feuillets bichromatiques n'est affecté d'aucune trace de bioturbation. Sporadiquement, l'alternance régulière passe à un feutrage organique très dense qui inclut des particules silicoclastiques (quartz, argiles) et des cristaux de calcite diagénétique. L'observation au MEB de ce feutrage organique (Figs 3, 4) fait apparaître un ensemble de structures géométriques déterminant une maille constante et régulière composée de cristaux calcitiques allongés et disposés en croix. Cet agencement correspond à l'ultrastructure des coques de schizosphères qui, décrites pour la première fois par Deflandre & Dangeard (1938), ont ensuite été signalées par de nombreux auteurs dans les séries jurassiques (Cayeux 1939 ; Urbain 1951 ; Deflandre 1959 ; Rioult 1964, 1968 ; Amézieux 1972 ; Noël 1972 ; Aubry & Depêche 1974 ; etc.). Le rôle déterminant de ce nannoplancton dans la genèse de certains calcaires a été souligné par Bernouilli & Renz (1970) et Bernouilli & Jenkins (1970). Dans nos échantillons, seule

l'espèce *Schizosphaerella punctulata* Deflandre *et* Dangeart, 1938 a pu être reconnue (détermination D. Nöel).

Liste faunique :
Arthropoda. Crustacea : rares *Proeryon* sp.
Insecta : aucun.
Mollusca. Ammonoidea : ce sont majoritairement des *Harpoceras falcifer*, associés à des *Dactylioceras* sp., *Tiltoniceras* sp., *Phylloceras* sp. et *Hildoceras* sp. Les *Aptychus* sp. sont rares.
Belemnoidea : nombreux rostres attribuables à plusieurs espèces de bélemnites.
Lamellibranchia : des coquilles de posidonies (*Posidonia* sp. = *Bositra* sp.) (Lamellibranchia Pteriidae) sont dispersées dans toute l'épaisseur de la série.
Vertebrata. Ils se présentent généralement à l'état fragmentaire.
Actinoptérygiens : *Leptolepis coryphenoides*, *Lepidotes* sp., *Pachycormus* sp.
Ichthyosaures.

Les niveaux à nodules
Deux niveaux à nodules calcaires très riches en posidonies, *Harpoceras* sp. (Hildoceratidae Hyatt, 1867) et *Dactylioceras* sp. (Dactylioceratidae Hyatt, 1867) ont été reconnus (horizons Nod. 1 et Nod. 2 ; Fig. 2). Au sein de ces niveaux, les nodules ne sont pas répartis régulièrement mais concentrés en « nids ». Ils présentent une face inférieure très bombée, la supérieure étant nettement plus plane (Fig. 5). Les deux faces sont souvent tapissées de posidonies dont les valves en connexion montrent que ces lamellibranches ont vécu et sont morts en masse sur place. Tous contiennent un macrofossile animal ou végétal. La plupart recèlent de nombreuses formes juvéniles (et pontes ?) de céphalopodes (ammonites ou nautiles) et la microsparite qui les constitue est généralement surchargée de pyrite. Leur taille est fonction de celle de l'organisme inclus, elle varie de 5 cm à plus de 2 m. À titre d'exemple, un nodule long de 1,8 m recèle le squelette complet d'un ichthyosaure, un autre de 2,3 m englobe un tronc d'arbre. Également très variable, leur forme respecte la morphologie du fossile qu'ils contiennent. Ce dernier peut se prolonger latéralement à l'extérieur du nodule, dans le plan de stratification. Les restes complets en connexion de certains ichthyosaures sont ainsi emballés dans plusieurs nodules, à la manière des grains d'un chapelet.

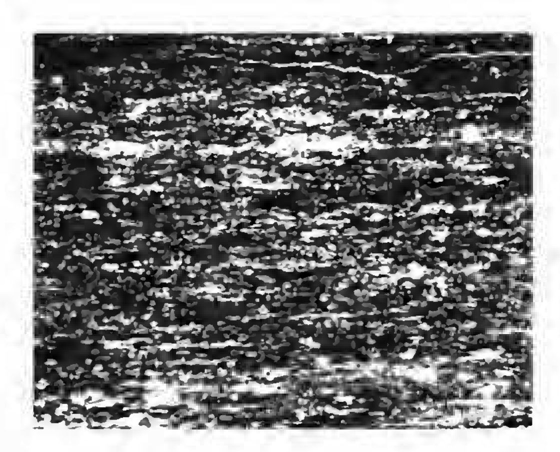


FIG. 3. — Réseau de *Schizosphaerella punctulata* Deflandre *et* Dangeart, 1938 (schizosphère). Échelle : 1 000 µm.

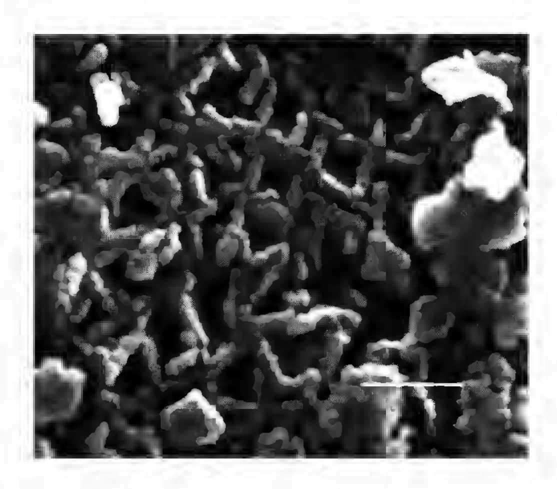


FIG. 4. — Détail du test de *Schizosphaerella punctulata* : réseau quadrangulaire de cristaux calcitiques disposés en croix (laminites au contact avec les lentilles, Bascharage). Échelle : 100 µm.

Liste faunique et floristique :
Plantae. Branches et troncs d'arbres en bon état de conservation (rares *Otozamites* sp. et rameaux de conifères, *Thyon* sp.).
Arthropoda. Insecta : absents.

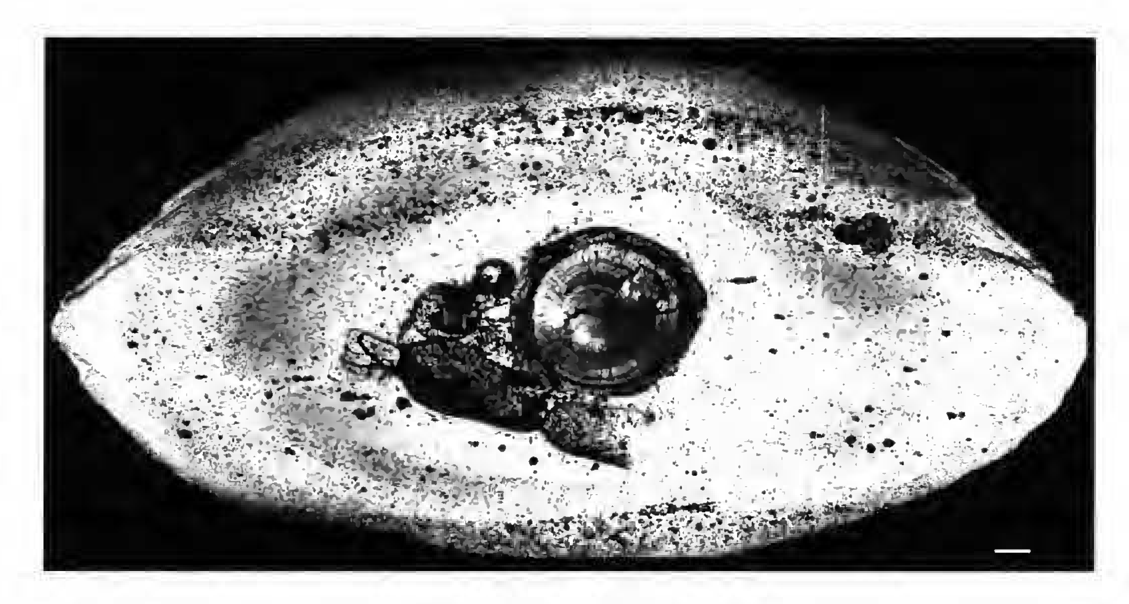


Fig. 5. — Coupe dans un nodule (Bascharage). Le noyau est un fragment de branche dont l'écorce est dilacérée. L'auréole plus sombre correspond à un développement de pyrite. Échelle : 1 cm.

Mollusca. Ammonoidea : *Harpoceras* sp. (grands spécimens). Nombreuses formes juvéniles (premiers stades) d'ammonites ou de nautiles associées à des adultes.

Nautiloidea : quelques individus isolés dont la coquille est remplie du même sédiment que celui qui constitue les nodules.

Belemnoidea et Theutoidea : de grands individus

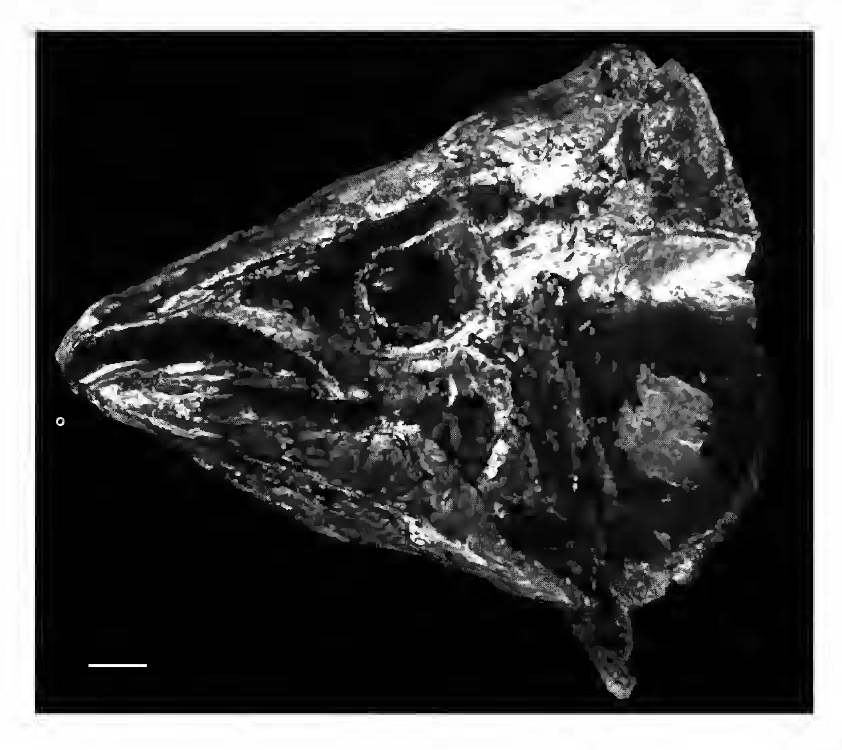


Fig. 6. — *Pachycormus* sp., nodule, Bascharage. Échelle : 1 cm.

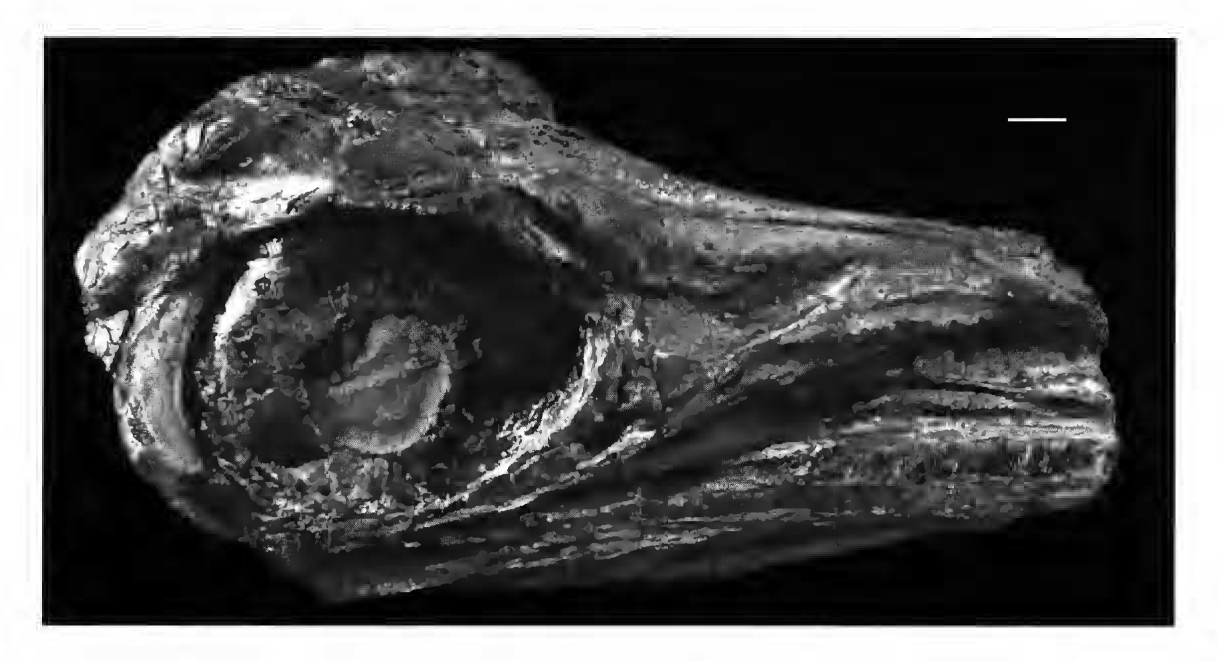


FIG. 7. — Ichthyosaure, crâne d'un individu juvénile. Nodule, Bascharage. Échelle : 1 cm.

avec poche à encre préservée [*Geopeltis* Van Regteren, 1949 (= *Geotheutis* Naef, 1921) sp. ou *Teudopsis* Deslongchamps, 1835 (= *Belotheutis* Münster, 1843) sp.].

Vertebrata. La faune de vertébrés est plus abondante et mieux conservée que celle récoltée dans l'épaisseur des laminites.

Actinoptérygiens : *Lepidotes elvensis* Blainville, *Pachycormus* sp. Agassiz, 1833 (Fig. 6), *Caturus* sp. Agassiz, 1834 (spécimens complets ou gros fragments).

Nombreux jeunes spécimens d'ichthyosaures (Fig. 7), un crocodilien, un fragment possible de ptérosautien indéterminé.

Le dépôt latéral aux nodules

Latéralement, les nodules passent à un sédiment très finement laminé, agencé en doublets de feuillets inframillimétriques clairs/sombres. Leur composition [lamines claires = quartz + calcite ; lamines sombres = matière organique + pyrite] est identique à celle des laminites qui constituent la masse de la série.

Liste faunique :

Dans l'ensemble, la faune est très proche mais nettement moins bien conservée que celle contenue dans les nodules : nombreux *Harpoceras* sp. et débris organiques divers d'origine marine (individus en connexion et fragments de taxa également présents dans les nodules).

Le niveau à lentilles

Les lentilles ont une forme grossièrement ellipsoïdale très aplatie (Figs 8, 9). Leur longueur varie de 30 cm à 1 m, leur épaisseur de 6 à 10 cm. Les faces supérieures et inférieures sont peu convexes, parfois planes. Elles sont constituées d'une microsparite laminée. À la cassure, les lentilles présentent une teinte verdâtre-grisâtre ou noirâtre. Les premières recèlent des fossiles très pyritisés et extrêmement bien conservés, les autres sont nettement moins riches en pyrite. En règle générale, la pyrite est très développée au cœur de la lentille et disparaît progressivement vers les bordures supérieure et inférieure, au profit du développement tout aussi progressif d'un feutrage organo-minéral qui atteint sa densité maximale au passage avec les laminites encaissantes.

Plans parallèles dans la partie médiane de la lentille, les feuillets qui la constituent épousent brutalement sa forme extérieure en passant latéralement à une laminite avec une compaction



FIG. 8. — Lentille à l'affleurement, interstratifiée dans les laminites (h: 9 cm ; L: 70 cm).

différentielle d'ordre 4. Hanzo (1978) admet ce même taux de compaction pour les marnes de Bettembourg.

Liste faunique et floristique :
La faune est proche dans les trois types de lentilles, bien que plus riche en crustacés et insectes

FIG. 9. — Lentille isolée. Noter le comportement des lamines qui s'infléchissent pour passer latéralement aux laminites. Échelle : 1 cm.

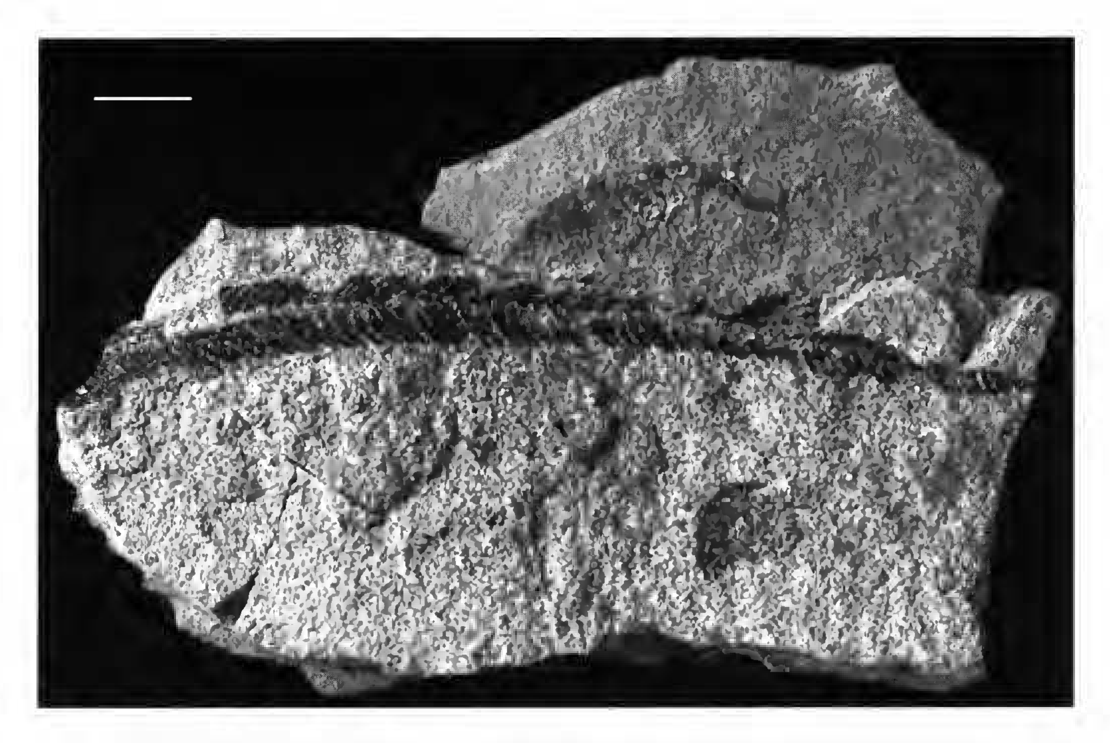


FIG. 10. — *Otozamites* sp. avec crustacé, CCA (équivalent latéral de la couche à lentille), Bettembourg. Échelle : 1 cm.

dans les vertes. Elle est, par contre, totalement différente de celle des niveaux à nodules et, dans tous les cas, plus riche que celle des laminites.

Plantae. Très rares *Zamites* sp. ou *Otozamites* sp. (Fig. 10), *Equisetum* sp.

Arthropoda. Crustacea : *Proeryon* sp., « crevettes » voisines du genre *Atrimops* (Fig. 10). Insecta : très nombreux, ils appartiennent à dix ordres différents (Phasmatodea, Odonata, Paraplecoptera, Coleoptera, Psocoptera, Mecoptera, Trichoptera, Neuroptera, Hymenoptera, Diptera). L'inventaire non exhaustif des espèces dépasse actuellement deux cents taxa, pour la plupart inédits, sauf les Odonata (Nel *et al.* 1993) (Fig. 15). C'est de loin le groupe le plus diversifié. La densité moyenne en insectes est beaucoup plus importante dans les lentilles vertes (cinquante à soixante individus par 10 dm^3) que dans les grises (deux ou trois individus par 10 dm^3). Des dessins et certaines pigmentations d'ailes d'insectes sont préservés.

Cephalopoda. Ammonoidea : très rares *Aptychus* sp. ; rares *Tiltoniceras* sp. ou *Phylloceras* sp. ; très peu d'adultes, aucune forme juvénile. Belemnoidea ou Theutoidea : très rares et petits spécimens, un individu plus grand avec poche à encre conservée.

Vertebrata. Actinoptérygiens : *Leptolepis coryphaenoides* Bronn (Leptolepidae) (Fig. 11), *Tetragonolepis* sp. Bronn, 1830 (Fig. 12), *Pholidophorus* sp. Agassiz, 1832 (Fig. 13), *Dapedius* sp. Leach, 1822 (Dapediidae) (Fig. 14), *Euthynotus* sp. Wagner, 1860.

Un crocodilien (quatre spécimens fragmentaires) ; des restes d'ichthyosaures (deux vertèbres).

Le dépôt latéral aux lentilles

Les lentilles passent latéralement à une alternance de lamines claires (quartz + calcite) et sombres (matière organique + pyrite) inframillimétriques, identique à celle des laminites et du niveau à nodules. Ce faciès évolue parfois en un feutrage organo-minéral très dense et toujours laminé qui inclut de fins débris de quartz et des cristaux de calcite. Ce sédiment présente donc une composition et une structuration sensiblement différentes de celles des lentilles.



FIG. 11. — *Leptolepis coryphaenoides* sp., lentille, Bascharage. Échelle : 1 cm.

Liste faunique et floristique :

Plantae. Rare, toujours fragmentaire et difficilement déterminable, la flore est surtout représentée par du bois fossile de gymnosperme (jayet).

Arthropoda. Crustacea : très rares fragments de *Proeryon* sp. et des fossiles indéterminables rappelant des crevettes.

Insecta : aucun.

Mollusca. Ammonoidea : *Harpoceras falciferum* (jeunes et adultes) ; rares *Phylloceras* sp., *Dactylioceras* sp. et *Tiltoniceras* sp.

Belemnoidea et Theutoidea : rares spécimens indéterminables avec poche à encre associée.

Lamellibranchia : quelques posidonies concentrées par place ou écrasées au toit des lentilles.

Vertebrata. Actinoptérygiens : *Leptolepis coryphaenoides* (individus très souvent incomplets ou débris isolés), *Tetragonolepis* sp. (deux individus entiers), *Pachycormus* sp. (de très rares écailles).

Quelques vertèbres isolées d'ichthyosaures.

Discussion

Les faunes et flores des faciès à lentilles et à nodules sont nettement distinctes (tableaux 3, 4, 5, 6 en annexe) et reflètent des milieux et des processus taphonomiques très contrastés. Les espèces communes à ces deux paléoenvironnements de dépôt sont rares : *Pachycormus* sp., ichthyosaure, *Harpoceras* sp. (jeunes individus dans les lentilles, adultes et pontes dans les nodules) et *Tiltanoceras* sp.

L'entomofaune, abondante et très variée dans les lentilles, est en revanche absente dans les laminites et les nodules. Il ne peut s'agir d'un problème d'échantillonnage, car les collectes ont été soigneuses et abondantes. Cette absence ne peut pas non plus être liée à un problème de conservation, car la cuticule des insectes est réputée plus résistante aux processus de dégradation que les empreintes des parties molles des céphalopodes Theutoidea trouvés dans les nodules (Allison 1988).

Cette entomofaune est constituée pour plus de 50 % d'insectes complets, au corps en connexion et en très bon état de conservation, ce qui suggère un enfouissement sur ou à proximité du lieu de leur mort. Tous, ou presque, sont des adultes volateurs ou, pour quelques-uns, aquatiques d'eau douce comme les Gyrinidae (Nel 1989). Les formes larvaires sont douteuses et très peu nombreuses. Si ces insectes ne se sont pas développés et n'ont pas vécu sur les lieux de leur enfouissement, ils sont par contre susceptibles d'avoir été transportés par des courants aériens ou par des cours d'eau (pour les formes aquatiques largement minoritaires).

Les milieux de dépôt et de fossilisation des nodules et des lentilles sont donc distincts. Les premiers recèlent une faune exclusivement marine exempte de tout élément terrestre ou estuarien, excepté des débris ligneux ; les secondes livrent une faune et une flore terrestres associées à des éléments fluvio-estuatiens et marins.

Il est donc raisonnable de penser que le sédiment constituant les lentilles s'est déposé dans un environnement nettement plus proche de terres émergées que les autres composantes de la série, cette proximité permettant des apports fauniques continentaux importants et variés.

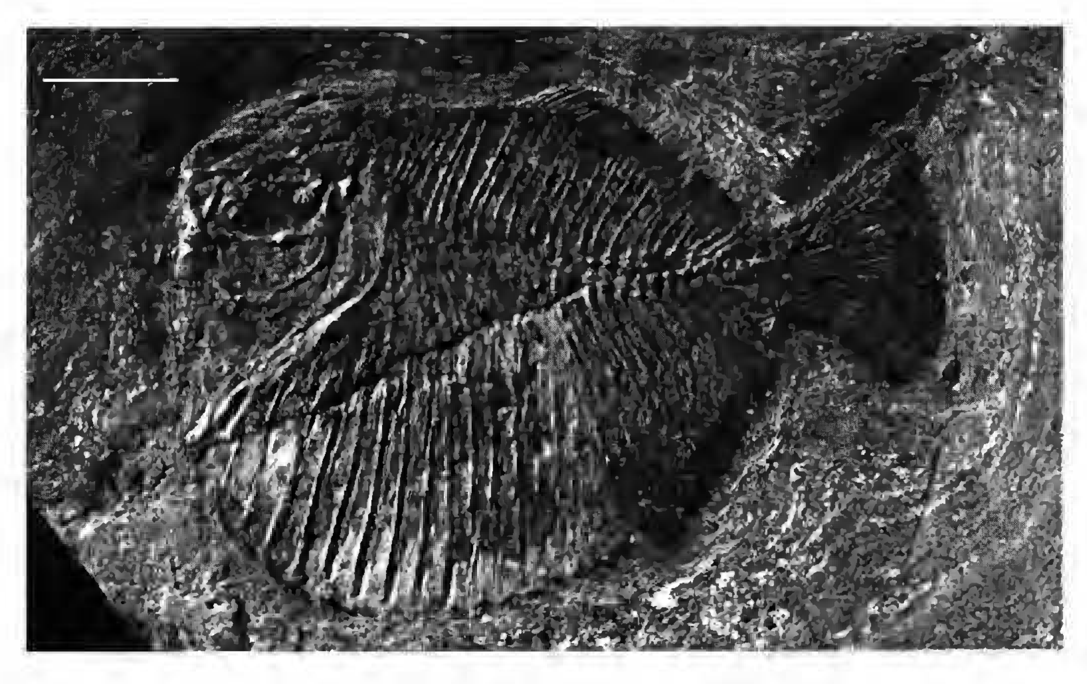


FIG. 12. — *Tetragonolepis* sp., lentille, Bascharage. Échelle : 1 cm.

LA SÉRIE DE BETTEMBOURG-KAYL
(le site « Luxgard II »)

Les conditions d'affleurement n'ont pas permis d'observer la base de la série toarcienne qui, à Bettembourg, est fortement dilatée (18 m). Cependant, les niveaux à nodules et à lentilles sont parfaitement corrélables (Fig. 2). Les lentilles contiennent une forte proportion de matière organique non oxydée et de pyrite. Elles peuvent passer latéralement à un banc calcaire continu (CCA) très riche en formes juvéniles de *Leptolepis coryphaenoides* et en crustacés (*Atrimops* sp.), associés à de nombreuses formes juvéniles de céphalopodes (ammonites ou nautiles) et à des lamellibranches non déterminables. Les mortalités massives peuvent être mises en relation avec les conditions d'anoxie qui régnaient sur le fond ou dans l'épaisseur de la tranche d'eau au moment des éclosions. Le banc continu (CCA) a été également observé à Sanem (2 km de Bascharage), Dudelange (4 km de Bettembourg), Esch-sur-Alzette et Pétange (1 km de Bascha-rage). Nous y avons récolté des ammonites (*Harpoceras*, *Tiltoniceras*), de rares fragments de *Leptolepis coryphaenoides* et du bois, mais aucun insecte.

Si le niveau à lentilles reconnu à Bettembourg est lithologiquement proche de celui de Bascharage, il en diffère cependant sensiblement dans sa composition faunique par l'absence totale des insectes. Ceci pose problème, sachant que Delsate *et al.* (1992) signalent la présence d'un Odonata Heterophlebioidea ou Anisoptera et d'ailes de Blattodea, récoltés dans des « éléments lenticulaires » d'âge Toarcien inférieur (« schistes de Grandcourt » = « schistes carton ») d'Aubange (Lorraine belge). Les auteurs situent cet horizon à l'extrême base de la série, au contact des marnes bleu-gris de la zone à *Dactylioceras semicelatum* et *Dactylioceras tenuicostatum*, mais n'en fournissent aucune description faciologique. Il nous est donc impossible de considérer cet horizon comme un équivalent de notre niveau à lentilles.

Les structures internes des nodules et des lentilles sont respectivement identiques à celles de Bascharage, mais les nodules de Bettembourg contiennent une plus forte proportion de pyrite.

La faune des nodules de Bettembourg-Kayl est analogue à celle des nodules de Bascharage :



FIG. 13. — *Pholidophorus* sp., lentilles Bascharage. Échelle : 1 cm.

Harpoceras et *Tiltoniceras* de grande taille associés à des pontes (?) de céphalopodes, actinoptérygiens et ichthyosaures d'une taille sensiblement plus importante qu'à Bascharage et débris ligneux. Par contre, la faune des lentilles (ou du banc continu : CCA) diffère de celle récoltée à Bascharage (Tableau 1) par l'absence totale d'entomofaune et d'importantes variations dans les proportions des groupes d'organismes marins. Dans les deux gisements (Bascharage et Bettembourg), la faune marine est très peu diversifiée puisqu'aucun reste fossile des nombreux groupes plus ou moins bien représentés par ailleurs, dans les mers liasiques européennes (échinodermes, brachiopodes, spongiaires, coraux, etc.), n'est présent. Les paléoenvironnements de dépôt devaient donc être très littoraux, du moins au moment de la formation du niveau à lentilles, mais aucun des taxons habituellement inféodés au domaine marin littoral n'a été reconnu. Ils

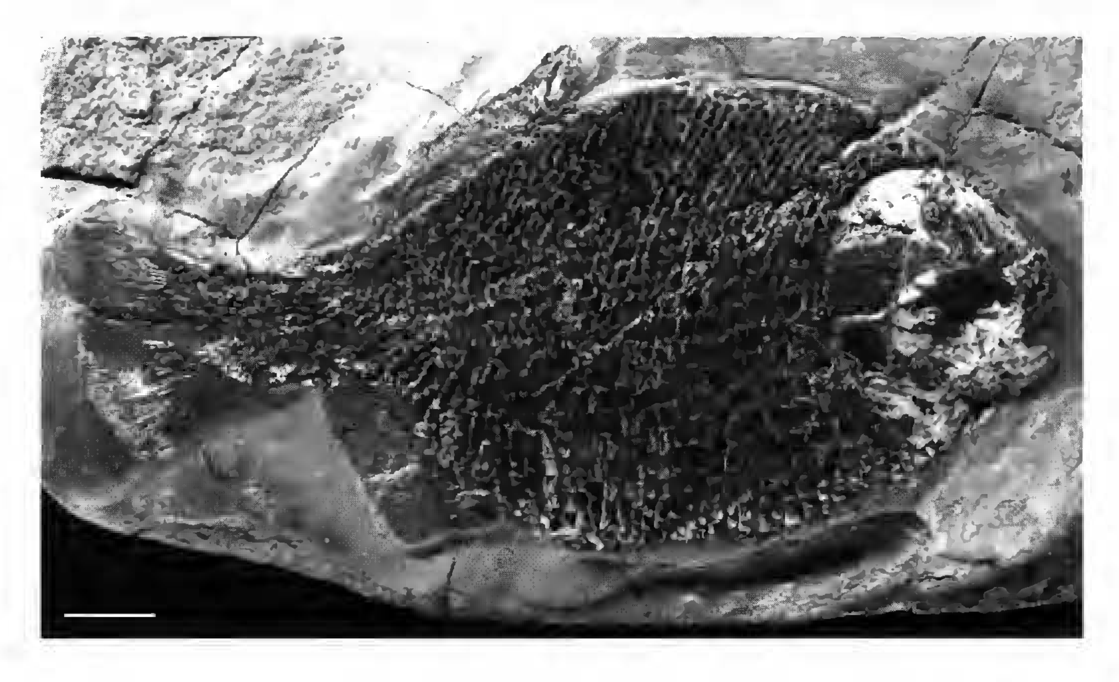


FIG. 14. — *Dapedius* sp., lentille, Bettembourg. Échelle : 1 cm.



FIG. 15. — Odonata Liassogomphidae *Phthitogomphus angulatus* (Handlirsch, 1939). Aile antérieure. Lentille, Bascharage. Échelle : 1 cm.

correspondraient plutôt à un fond de vase pauvre en vie, déficitaire en oxygène et sporadiquement favorable au développement de formes opportunistes comme les posidonies qui, selon Kauffman (1978), s'accommodaient de fonds modérément oxygénés.

GENÈSE DES DIFFÉRENTES FORMATIONS

LES LAMINITES

En Europe occidentale, le Toarcien inférieur est caractérisé par le dépôt de sédiments laminés qualifiés par les auteurs de « schistes carton », « schistes bitumineux » ou « schistes à posidonies ». Cette lamination est classiquement attribuée à la prolifération répétée de mattes microbiennes, en contexte anoxique, au contact du fond des étendues d'eau. Les micro-organismes filamenteux (cyanobactéries, actinomycètes, bactéries sulfo-réductrices, etc.) sont à l'origine d'un feutrage qui piège les particules détritiques, contrarie l'installation du benthos et inhibe les processus de décomposition de la matière organique (O'Brien 1990).

Pour leur part, Busson & Noël (1972) signalent le rôle prépondérant des tests d'organismes nannoplanctoniques dans la genèse des laminites à couple [calcaire/matière organique ou argileuse], dont des schizosphères dominantes, dans les « schistes carton » du Toarcien inférieur de Fécocourt (Est du Bassin de Paris, France). Ils considèrent qu'il s'agit de sédiments planctoniques, déposés et préservés sur un fond anoxique.

La mer toarcienne correspondait donc à un milieu favorable à la fois à l'épanouissement d'un plancton à schizosphères dont les tests alimentaient, saisonnièrement ou de façon permanente, un dépôt finement laminé, en milieu anaérobie (aucune trace de bioturbation). Cet environnement était sporadiquement propice au développement de tapis microbiens qui se développaient à la faveur de phases de confinement. Les différents faciès que nous avons étudiés suggèrent l'image d'une mer vraisemblablement peu profonde (fond de golfe, par exemple), sensible aux fluctuations eustatiques, qui s'étendait à proximité d'un continent ou d'une île au paysage très mature alimentant le bassin en matériel détritique très fin (quartz et argiles).

LES NODULES DE LA PARTIE INFÉRIEURE DE LA SÉRIE DE BASCHARAGE

(marnes bleues à *Dactylioceras* ; Fig. 2, Nod. 1)

Des travaux effectués sur l'échangeur de Bettembourg (autoroute Luxembourg-Thionville) ont permis à Hanzo (1978) d'observer une partie du Toarcien le plus inférieur. L'auteur y décrit des nodules carbonatés appartenant à la zone à *Dactylioceras tenuicostatum* qui correspond aux marnes bleues de la base de la série de Bascharage. Dans ce niveau, Hanzo ne signale que quelques débris osseux, de petites ammonites et des ostracodes. Les descriptions

fournies par l'auteur pourraient laisser penser que ces nodules sont l'équivalent des lentilles que nous étudions. Cependant, une différence essentielle, autre que la composition faunique et floristique, apparait : la structuration de ces nodules correspond exactement à celle des marnes qui les encaissent (= « schistes carton » *sensu* Hanzo). Sur ce site, Hanzo signale un autre niveau plus inférieur, à nodules également calcaires, contenant des actynoptérygiens. Il est évident qu'aucun des niveaux décrits par cet auteur n'est l'équivalent des niveaux à nodules (Nod. 1 et Nod. 2) à macrorestes de grands vertébrés marins de Bascharage et de Bettembourg-Kayl car, fondamentalement, la faune qu'ils contiennent ne diffère pas de celle des marnes latérales.

La genèse des nodules décrits par Hanzo résulte de processus strictement diagénétiques et « n'est pas liée à une zone riche en organismes qui constitueraient leur germe » au même titre que les nodules des marnes bleues de la série inférieure de Bascharage. Celle des nodules et des lentilles de la série supérieure de Bascharage est différente.

Les nodules de la partie supérieure des séries de Bascharage et de Bettembourg (Fig. 2, Nod. 2)

Leur genèse diffère de celle d'autres nodules décrits dans les formations toarciennes, notamment ceux de la carrière de l'Échelle près de Hirson (France), interprétés par Bontes (1941) comme le résultat d'encroûtements successifs par roulement des nodules en cours de formation. Prager & Ginsburg (1989) signalent des nodules carbonatés actuels en Floride dont la formation, proche de celle des nodules de l'Échelle, serait due au remaniement de galets mous. De par leur mode de formation, ces nodules sont très irréguliers, ce qui les différencie de ceux de Bascharage et de Bettembourg.

D'autre part, la formation des nodules de Bascharage et de Bettembourg coïncide avec un changement des conditions du milieu de sédimentation caractérisé par un développement remarquable de posidonies qui sont plutôt rares dans le reste de l'épaisseur de la série.

L'abondance des coquilles de posidonies dans les mers toarciennes a suscité de nombreuses controverses. La pénurie en oxygène libre dans la nappe d'eau profonde exclut un mode de vie benthique, mais la grande taille atteinte par certaines espèces ne permet pas d'envisager une vie pélagique. Des mœurs pseudoplanctoniques comme celles des *Inoceramus* des mêmes gisements impliquent un recouvrement des aires de distribution des lamellibranches et des objets flottants. Or une telle situation n'a pas pu être établie avec certitude. Oschman (1994) envisage l'adaptation des posidonies à des eaux à faible teneur en oxygène, grâce à une hétérochronie du développement. La maturité sexuelle des animaux est acquise précocement durant leur stade larvaire pélagique : c'est le phénomène de progenèse. La pérennité des caractères larvaires, en particulier la petite taille des individus et la minceur de la coquille, est éminemment favorable à la flottaison des lamellibranches près de la surface de l'eau. Une telle interprétation s'appliquerait plus particulièrement à la sous-espèce *Bositra radiata parva*.

L'absence de toute trace de bioturbation, la préservation des parties molles de nombreux fossiles (actinoptérygiens, ichthyosaures, bélemnites, etc.) et le développement de pyrite impliquent des conditions anoxiques qui, développées au contact du fond de la nappe d'eau, favorisent à la fois la conservation de la matière organique et l'épanouissement de communautés bactériennes anaérobies. Des bactéries sulfo-réductrices libèrent de l'H_2S qui se combine au fer pour donner les concrétions de pyrite. Un tel métabolisme provoque une augmentation de l'alcalinité du milieu et favorise, localement, la précipitation de calcaire autour des cadavres, initiant ainsi la nodulisation. La formation des couches à nodules correspondrait de ce fait à un événement diagénétique précoce qui expliquerait l'excellent état de conservation des fossiles. En outre, l'ambiance carbonatée fait obstacle à la dissolution des coquilles calcaires.

Comme pour d'autres organismes (ammonites, actinoptérygiens, etc.), la mort en masse des posidonies et leur préservation *in situ* (valves en connexion), témoignent d'événements catastrophiques ponctuels. Ces mortalités massives ne se limitent pas aux niveaux à nodules, mais interviennent à plusieurs reprises au cours du dépôt des laminites. Elles ont été diversement interprétées. Pour Seilacher (1990), les animaux vivant à

proximité du fond périraient périodiquement lors de fortes tempêtes qui, en brassant les sédiments accumulés sur le fond de la mer, provoqueraient la libération massive de l'H_2S et l'intoxication de la faune. Si la tranche d'eau est faible, cet empoisonnement affecterait l'ensemble des populations nectoniques et pseudoplanctoniques.

Le niveau à lentilles

Ce niveau correspond à un changement brutal de la faune et à la disparition du nannoplancton à schizosphères. Comme pour les nodules, la précipitation des carbonates, accompagnée par le développement de pyrite, suppose une modification du chimisme des eaux qui s'est répercutée sur la nature des associations bactériennes. En revanche, le cachet délibérément continental du contenu paléontologique (végétaux, insectes, crocodiles) des lentilles de Bascharage implique la proximité de terres émergées. Les lentilles calcaires traduisent peut-être de brefs épisodes régressifs au cours de la phase transgressive du Toarcien inférieur. De tels événements provoquent la réduction de la tranche d'eau et entravent les communications avec la haute mer et la pénétration du necton marin (ammonites, bélemnites). Conjointement, apparaît une multitude de collections d'eaux plus ou moins stagnantes dont la surface se couvre de voiles microbiens. Ceux-ci peuvent se réduire à un mince biofilm à peine décelable ou, au contraire, former de véritables tapis (Baudoin 1957). Par l'enchevêtrement de formes microbiennes filamenteuses (bactéries, champignons, etc.) et une intense production de mucilage (Gall 1995), ils constituent des pièges pour des organismes de petite taille, en particulier pour les insectes. De temps en temps, les voiles microbiens se rompent et se fragmentent. En sombrant, ils entraînent les organismes piégés au contact du fond où ils seront recouverts par le sédiment. Les conditions anoxiques qui règnent dans ce dernier et la prolifération probable de mattes microbiennes benthiques favorisent la fossilisation des parties molles des mollusques et des vertébrés, ainsi que la préservation de la pigmentation de certains insectes.

Les différences importantes de composition faunique entre les lentilles de Bascharage et les « lentilles + banc continu » de Bettembourg, roches de nature lithologique pourtant identique, évoquent des milieux de dépôt très proches mais différemment alimentés en organismes (Tableau 1). La prépondérance des organismes d'origine terrestre à Bascharage et des organismes marins à Bettembourg s'explique aisément par une distalité plus importante à Bettembourg qu'à Bascharage, ce qui n'implique pas nécessairement une plus grande bathymétrie.

Tableau 1. — Comparaison des lentilles de Bascharage et de Bettembourg-Kayl.

	Bascharage	Bettembourg
Dimensions	≤ 1 m	> 2 m
Texture	grain très fin	grain plus grossier
Insectes	très abondants	absents
Leptolepis coryphaenoides	nb. adultes, pas d'alevins	nb. alevins, peu d'adultes
Plantes	très rares	abondantes
Ammonoidea adultes	très rares	abondants
Ammonoidea jeunes	rares	abondants
Aptychus sp.	très rares	très nb., isolés ou en place
Posidonies	très rares (au toit)	abondantes

L'hypothèse la plus vraisemblable pour expliquer la formation des lentilles est que le milieu ait atteint l'émersion. Le sédiment qui les constitue correspondrait à un remplissage de « flaques » d'eau saumâtre, alimentées à la fois en organismes terrestres venant d'un rivage très proche, et en organismes marins entraînés régulièrement par les marées. Le remplissage de ces dépressions a dû être très rapide, et la remise en eau du milieu, générant un nouveau dépôt de laminites à schizosphères, a protégé l'ensemble de l'action de l'oxygène. Dans cette hypothèse, ces milieux représentent des systèmes géochimiquement favorables à la fossilisation des organismes et au développement de pyrite.

Les dépôts équivalents de Bettembourg se sont probablement formés dans des conditions analogues, mais les apports fauniques, essentiellement marins, impliquent une plus grande distance par rapport au rivage.

Nous obtenons donc l'image de milieux aquatiques restreints (fond de golfe, lagunes, etc.), d'extensions variables, mais toujours peu profonds. Ces réceptacles se remplissent rapidement de sédiments et piègent des animaux terrestres et marins à Bascharage, strictement marins à Bettembourg. Le matériel carbonaté des lentilles résulte d'une diagénèse spécifique, étroitement conditionnée par une importante concentration de matière organique qui génère localement des conditions interstitielles favorables au développement de carbonate. De ce fait, la morphologie actuelle des lentilles résulte d'une compaction différentielle.

COMPARAISON DES DIFFÉRENTS TYPES DE LENTILLES

À Bascharage, les lentilles observées sur les affleurements des sites de Luxgard I et TDK sont de trois types (Tableau 2a) répartis sur trois zones distinctes :

– type I : lentilles « grises », pauvres en insectes (1 ou 2 spécimens/lentille), crustacés (*Proeryon*) très rares, theutoïdes (1 spécimen/40 lentilles pour un échantillonnage de plus de 1000 lentilles) ;

– type II : lentilles « vertes », riches en pyrite, en matière organique et en insectes (10 à 15 spécimens/lentille), crustacés (*Proeryon*) rares (1 ou 2 spécimens/lentille) ;

– type III : lentilles « noires », riches en silice, très pauvres en insectes (1 spécimen/10 lentilles), crustacés (*Proeryon*) très rares.

Méthode de parcimonie de Wagner avec scénario minimal, par analyse directe des faunes

L'utilisation de la méthode de parcimonie de Wagner permet une première comparaison des trois types de lentilles de Bascharage et du niveau à lentilles de Bettembourg avec les niveaux à nodules et laminites de Bascharage. Ce type d'étude a déjà été mis en œuvre dans des analyses synécologiques sur les formes actuelles (Lambshead & Paterson 1986 ; Bellan-Santini *et al.* 1994). L'aspect théorique de la méthode est exposé *in* Masselot *et al.* (1997). Brièvement, cette méthode revient à transférer la parcimonie de Wagner, telle qu'elle est utilisée en analyse phylogénétique des organismes actuels et fossiles, en

TABLEAU 2a. — Comparaison des contenus paléontologiques des trois types de lentilles.

	Bettembourg	Bascharage type I	type II	type III
Theutoïdes	abondants	présents	très rares	très rares
Crustacés	abondants	très rares	présents	très rares
Isopodes	absents	absents	absents	présents
Plantes	présentes	très rares	très rares	très rares
Insectes	absents	présents	abondants	présents

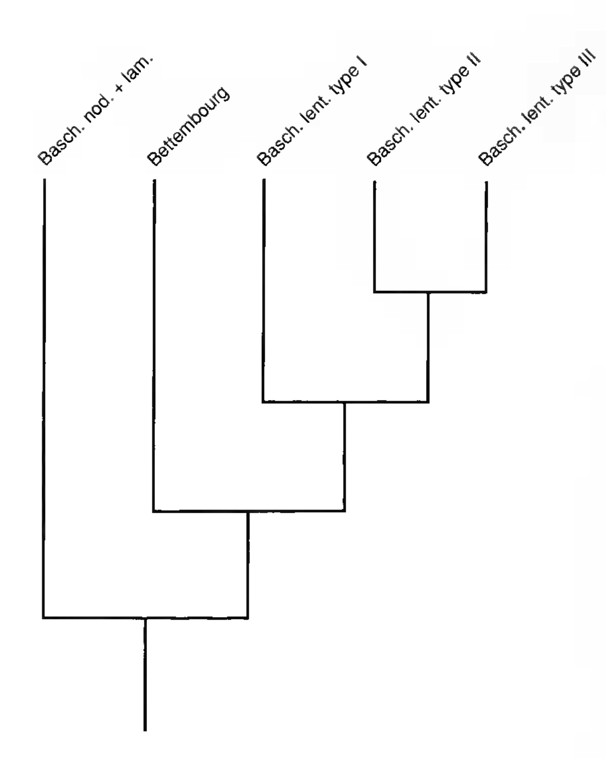
considérant les divers niveaux comme autant de taxons et les organismes fossiles comme des caractères dont les états sont définis par leur absence ou leur présence (et éventuellement leur abondance).

Nous avons défini quatorze caractères (voir liste des caractères et Tableau 8) pour cinq « taxons ». Le groupe externe servant à la polarisation des caractères est [Bascharage niveau à nodules + niveau à laminires] pour lequel l'origine marine de la faune ne fait pas de doute. La matrice obtenue est analysée au moyen du logiciel Paup 3.1.1. sur Macintosh. Trois options pour le traitement des caractères ont été comparées :

1. Tous les caractères sont non ordonnés (option « *unordered* » de Paup 3.1.1.) ; deux arbres de même longueur minimale sont obtenus (arbres 1 et 2, Longueur = 18 pas ; Indice de Cohérence CI = 1 ; Indice de Rétention RI = 1 ; RC (ou « *Rescaled Consistency Index* ») = CI × RI : 1). Ces indices, qui mesurent la quantité d'homoplasies (Darlu & Tassy 1993), montrent que les caractères choisis sont totalement congruents entre eux. Leur arbre de consensus est non résolu quant aux positions relatives des trois types de lentilles de Bascharage, mais ils donnent [Bettembourg] comme groupe-frère des [Basch lent.].

2. Les caractères 1, 2, 3 et 4 sont ordonnés (option « *ordered* » de Paup 3.1.1.).

3. Les caractères 1, 2, 3 et 4 sont irréversibles (option « *irreversible up* » de Paup 3.1.1.). Dans ces deux dernières options, on obtient un seul arbre minimal (arbre 1, Longueur = 19 pas ; CI = 0,947 ; CI excluant les caractères non informatifs = 0,923 ; RI = 0,923 ; RC = CI × RI : 0,874). Ces indices sont encore élevés et montrent que les informations livrées par les



Basch. nod. + lam.
Bettembourg
Basch. lent. type II
Basch. lent. type I
Basch. lent. type III

divers organismes sont congruentes. Cet arbre minimal résoud la trichotomie entre les trois types de lentilles. Il est congruent avec le scénario sur le gradient de distalité suivant : du plus distal au plus proximal (Tableau 2b) :

[Bascharage nodules + laminites] –> [lentilles de Bettembourg] –>
[Bascharage type I] –> [Bascharage type II] –>
[Bascharage type III].

Cette analyse confirme bien les affinités entre les niveaux à lentilles de Bettembourg et ceux de Bascharage. Les trois options sont de plus congruentes avec l'hypothèse de l'existence d'un gradient de distalité [Bascharage nodules + laminites] –> [Bettembourg lentilles] –> [Bascharage lentilles], du plus distal au moins distal. En revanche, l'option supposant le moins d'a priori possibles (tous les caractères non ordonnés) ne permet pas de conclure quant à la position de [Bascharage lentilles de type III] relativement à [Bascharage lentilles de type I] et [Bascharage lentilles de type II].

Comparaison fondée sur l'estimation des conditions de fossilisation

Une approche complémentaire, mais plus spéculative, peut être tentée. Elle est fondée sur l'introduction d'hypothèses supplémentaires sur les conditions de fossilisation des divers niveaux étudiés.

Les lentilles de Bettembourg livrent des theutoïdes, et des crustacés en abondance, mais aucun insecte (Tableau 2a). Les insectes des lentilles de Bascharage sont probablement allochtones, car leur grande diversité n'a pas d'équivalent actuel dans ce type de milieu littoral. Leur apport est aérien et fluviatile et peut être considéré comme uniforme. Par conséquent, leur rareté nettement plus grande dans le type I et le type III comparée à celles de type II n'est pas, a priori, liée à une différence de paléomilieu mais à des conditions de fossilisation plus favorables pour les lentilles de type II que pour celles de type I et de type III.
Cette hypothèse est cohérente avec la présence de crustacés dans les lentilles de type III et avec

Tableau 2b. — Interprétation des paléomilieux de dépôt des lentilles après correction des données taphonomiques.

	Bettembourg	Bascharage type I	type II	type III
Theutoïdes	abondants	présents	très rares	présents ?
Crustacés	abondants	présents ?	présents	présents ?
Isopodes	absents ?	absents ?	très rares ?	présents
Plantes	présentes	très rares	très rares	très rares
Insectes	absents ?	abondants	abondants	abondants

Tableau 2c. — Interprétation des paléoenvironnements de dépôt des lentilles tenant compte de l'éloignement au rivage.

	Bettembourg	Bascharage type I	type II	type III
Theutoïdes	abondants	abondants	très rares	présents ?
Crustacés	abondants	présents	présents	présents ?
Isopodes	absents ?	absents ?	très rares ?	présents
Plantes	présentes	très rares	très rares	très rares
Insectes	absents ?	abondants	abondants	abondants

l'absence de theutoïdes dans les lentilles de type III, mais semble en contradiction avec la présence de theutoïdes dans les lentilles de type I.

Cette contradiction peut être levée si nous supposons une différence de paléoenvironnement entre les lentilles de type I et de type II : celles de type I correspondraient à un milieu plus distal, avec un apport plus important en organismes marins que celles de type II, plus proximales. Mais cette étape du raisonnement ne fournit pas de renseignement sur le paléomilieu de type III.
La variation dans l'abondance des theutoïdes, organismes marins non ambigus, donne le gradient de distalité suivant, du plus distal au plus proximal (Tableau 2b) :

[lentilles de Bettembourg] –>
[Bascharage type I] –>
[Bascharage type II].

L'absence de renseignement sur les theutoïdes dans les lentilles de type III ne permet pas de conclure sur la distalité de ces lentilles. Les plantes, organismes d'origine terrestre, contredisent a priori le scénario précédent de gradient de distalité. Mais il s'agit là de l'hypothèse la plus « économique » car les autres scenarii possibles sur le gradient de distalité impliquent nettement plus de contradictions (concernant les theutoïdes, les insectes).
Dans le cadre de l'hypothèse précédente sur le gradient de distalité, la présence de crustacés dans les lentilles les plus distales de Bettembourg et dans celles de type II qui sont les plus proximales implique que ces organismes marins étaient présents dans le paléomilieu de type I mais ne s'y sont pas conservés. Si les theutoïdes, organismes nettement plus fragiles que les crustacés, s'y sont fossilisés, ils devaient y être nettement plus fréquents que les crustacés. Le tableau 2b peut être complété par le tableau 2c.

D'autre part, l'absence des isopodes dans les lentilles de Bettembourg suggère que ces organismes étaient absents dans le paléomilieu correspondant.
Dans le cadre de cette hypothèse, la présence des isopodes dans les lentilles de type III et leur absence (supposée) à Bettembourg et dans les lentilles de type II n'est congruente qu'avec l'hypothèse que celles de type III sont plus proximales que celles de type II, car les isopodes seraient alors à considérer comme des organismes vivant en milieu plus distal.
Dans le cadre de l'hypothèse contraire, le même raisonnement suggère que les lentilles de type II sont plus proximales que celles de type III car les isopodes seraient alors à considérer comme des organismes vivant en milieu plus proximal.
Il est impossible de conclure sur la position des lentilles de type II dans le gradient de distalité, bien que l'hypothèse minimale soit la première puisque la seconde implique une hypothèse supplémentaire sur la non-conservation des isopodes dans les lentilles de Bettembourg.
Le gradient de distalité le plus probable est alors (du milieu le plus distal au plus proximal) :

[Bettembourg lentilles] –> [Bascharage type I] –>
[Bascharage type II] –> [Bascharage type III].

Cette étude est congruente avec l'analyse de parcimonie de Wagner quant à une distalité plus

Tableau 3 — Comparaison faunique des gisements de Bascharage et de Bettembourg-Kayl. Actinoptérygiens. **L. Ba.**, lentilles, Bascharage ; **L. Be.**, lentilles, Bettembourg-Kayl ; **PL. Ba.**, pelites encaissantes des lentilles, Bascharage ; **PL. Be.**, pelites encaissantes des lentilles, Bettembourg-Kayl ; **N. Ba.**, nodules, Bascharage ; **N. Be.**, nodules, Bettembourg-Kayl ; **PN. Ba.**, pelites encaissantes des nodules, Bascharage ; **PN. Be.**, pelites encaissantes des nodules, Bettembourg-Kayl ; **P. Ba.**, pelites intermédiaires, Bascharage ; **P. Be.**, pelites intermédiaires, Bettembourg-Kayl ; **A**, absent ; **P**, présent ; **R**, présent mais rare (de 2 à 10 spécimens) ; **TR**, présent mais très rare (moins de 2 spécimens) ; **D**, présent et très fréquent, fossile le plus abondant dans le niveau concerné.

Fossiles/niveaux	**L. Ba.**	**L. Be.**	**PL. Ba.**	**PL. Be.**	**N. Ba.**	**N. Be.**	**PN. Ba.**	**PN. Be.**	**P. Ba.**	**P. Be.**
L. coryphaenoides	D	D alevin	P	P	TR	A	P	P	P	P
Lepidotes sp.	R	A	A	R	D	P	P	P	P	P
Dapedius sp.	P	P	P	A	A	A	A	A	A	A
Pholidophorus sp.	P	P	A	A	A	A	A	A	A	A
Pachycormus sp.	P	A	P	P	P	A	P	P	P	P
Caturus sp.	A	A	A	A	R	A	A	A	A	A
Tetragonolepis sp.	P	A	P	A	A	A	A	A	A	A
Euthynotus sp.	P	P	A	A	A	A	A	A	A	A

Tableau 4. — Comparaison faunique des gisements de Bascharage et de Bettembourg-Kayl. « Reptiles » (voir légende Tableau 3).

Fossiles/niveaux	**L. Ba.**	**L. Be.**	**PL. Ba.**	**PL. Be..**	**N. Ba.**	**N. Be.**	**PN. Ba.**	**PN. Be.**	**P. Ba.**	**P. Be.**
Crocodilien	P	A	A	A	P	A	A	A	A	A
Pterosaurien ?	A	A	A	A	TR	A	A	A	A	A
Ichthyosaure sp.	P	P	P	P	D	P	P	P	P	P

Tableau 5. — Comparaison faunique des gisements de Bascharage et de Bettembourg-Kayl. « Mollusques » (voir légende Tableau 3).

Fossiles/niveaux	**L. Ba.**	**L. Be.**	**PL. Ba.**	**PL. Be.**	**N. Ba.**	**N. Be.**	**PN. Ba.**	**PN. Be.**	**P. Ba.**	**P. Be.**
Harpoceras falcifer	R	P	R	P	P	P	P	P	D	D
Dactylioceras sp.	R	P	R	P	P	P	P	P	P	P
Tiltoniceras sp.	P	P	R	P	P	P	P	P	P	P
Phylloceras sp.	P	A	R	P	P	P	P	P	P	P
Hildoceras sp.	A	A	A	A	P	P	P	A	P	P
Lithoceras sp.	A	P	A	A	P	P	A	A	A	A
Aptychus sp.	TR	D	A	D	A	A	TR	TR	TR	TR
Nautiloidea	A	A	A	A	P	A	P	A	A	A
Geotheutis sp.	P	A	A	A	P	A	A	A	A	A
Pseudobelotheutis	P	P	A	A	A	P	A	A	A	A
Belotheutis sp.	P	A	A	A	P	A	A	A	A	A
Bélemnites sp.	TR	P	R	P	P	P	P	P	P	P
Posidonies	R	P	R	P	P	P	D	D	P	P

Tableau 6. — Comparaison faunique des gisements de Bascharage et de Bettembourg-Kayl. « Arthropodes et végétaux » (voir légende Tableau 3). Conservation des bois : **J**, jayet ; **Si**, silicifié avec préservation des structures.

Fossiles/niveaux	**L. Ba.**	**L. Be.**	**PL. Ba.**	**PL. Be.**	**N. Ba.**	**N. Be.**	**PN. Ba.**	**PN. Be.**	**P. Ba.**	**P. Be.**
Proeryon sp.	P	A	P	P	A	A	A	A	A	P
Atrimops sp.	TR	D	TR	R	A	A	A	A	A	A
Isopodes	R	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Insectes	D	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Otozamites sp.	TR	P	A	A	A	A	A	A	R	R
Equisetacea	P	R	P	R	A	A	A	A	A	A
Bois	Si	Si	J	J	Si	Si	J	J	J	J

TABLEAU 7. — Comparaison des milieux de fossilisations de Holzmaden, Bascharage et Bettembourg-Kayl.

HOLZMADEN	BASCHARAGE	BETTEMBOURG-KAYL
Transgression suivie d'une régression (Gall 1979)	Transgression suivie d'une régression avec phase d'émersion momentanée	Transgression suivie d'une régression avec phase d'émersion momentanée
Dépôts très monotones (pas de nodules ni de lentilles)	Trois accidents de sédimentation (nodules et lentilles)	Trois accidents de sédimentation (nodules et lentilles)
Milieu marin (faunes marines avec de rares bois flottés)	Milieu littoral (faunes marines et terrestres)	Milieu côtier (faunes marines avec des éléments terrestres)

TABLEAU 8. — Matrice d'analyse de parcimonie de Wagner des niveaux à lentilles de Bettembourg et Bascharage.

Localités/caractères	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Bettembourg	0	2	2	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1
Basch. lent. type I	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
Basch. lent. type II	2	1	1	2	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
Basch. lent. type III	2	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
Basch. nod. + lam.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

importante lors du dépôt des lentilles à Bettembourg qu'à Bascharage.

Ce résultat est à mettre en parallèle avec la présence relativement abondante par rapport à sa rareté habituelle, dans le niveau à lentilles de Bascharage, des actinoptérygiens *Tetragonolepis* sp. et avec leur absence à Bettembourg. Il est cohérent de penser que cet animal vivait probablement dans la zone littorale. Sa très grande rareté dans le Toarcien d'Holzmaden, gisement qui correspond à un paléomilieu nettement plus distal que Bascharage, est compatible avec cette hypothèse.

CONCLUSION

L'hypothèse de l'existence d'un épisode d'émersion à Bascharage-Bettembourg n'est pas en contradiction avec les données de l'histoire générale de la région au Toarcien. Il est généralement admis que le « golfe Toarcien du Luxembourg » s'est progressivement comblé. Le niveau à lentilles de Bascharage serait donc un témoin privilégié de l'une des phases de comblement d'un golfe peu profond, aux eaux stagnantes, où abondait une faune marine peu diversifiée. Certains organismes venaient s'y reproduire. L'abondance d'alevins (*Leptolepis coryphaenoides*) et de formes juvéniles de crustacés et d'ammonites, en particulier dans le niveau à lentilles de Bettembourg, suggère en effet que ce milieu correspondait vraisemblablement à une zone de reproduction et de développement pour ces organismes qui y trouvaient une abondante matière organique et peu de grands prédateurs par rapport à la mer ouverte. Notons qu'en Angleterre, les niveaux marins toarciens qui ont livré de très riches faunes d'insectes (Tillyard 1925 ; Zeuner 1962 ; Whalley 1985) sont aussi interprétés comme un milieu confiné de golfe en cours de comblement (Hallam 1967). Ces insectes semblent être fossilisés dans des lentilles de nature très semblable, sinon identique, à celle de Bascharage. Cela semble être la règle pour les gisements insectifères toarciens en Europe occidentale (Ansorge 1996).

Remerciements
Nous remercions J.-C. Fischer et S. Wenz, du Laboratoire de Paléontologie (MNHN, Paris)

ainsi que D. Noël (Laboratoire de Géologie, MNHN) pour leur précieux conseils lors de la réalisation de ce travail. Nous remercions M. D. Serette (Laboratoire de Paléontologie, MNHN), MM A. Beaudon et G. Hatat (Département de Géologie de l'université de Reims) pour la réalisation des dessins, le tirage des photographies et la fabrication des lames minces de roches. Nous remercions également la direction et les ingénieurs de TDK Recording Media Europe SA, Bascharage, G.-D. du Luxembourg, les entreprises Baatz (Diekierch-L) et leur personnel, le personnel du chantier de construction de l'usine de Luxgard II pour leur précieuse collaboration lors des fouilles. Nous remercions aussi tout particulièrement M. C. Teixeira (Diekierch-L) pour la découverte de nombreux fossiles dont une nouvelle espèce d'Odonata fossile.

RÉFÉRENCES

Allison P. A. 1988. — Konservat-Lagerstätten: cause and classification. *Paleobiology* 14 (4): 331-344.

Amézieux J. 1972. — Association de nannofossiles calcaires du Jurassique d'Aquitaine et du Bassin parisien, *in* Colloques sur les Méthodes et Tendances de la Stratigraphie. Orsay, *Mémoires du Bureau de Recherches Géologique et Minière*, Paris 77 : 143-151.

Ansorge J. 1996. — Insekten aus dem oberen Lias von Grimmen (Vorpommern, Norddeutschland). *Neue Paläontologische Abhandlungen*, Dresden 2: 1-132.

Aubry M. P. & Depeche F. 1974. — Recherches sur les Schizosphères. I - Les Schizosphères de Villers-sur-Mer : variations morphologiques, ultrastructure et modifications diagénétiques. *Cahiers de Micropaléontologie*, Paris 1 : 1-15.

Barthel K. W. 1970. — On the deposition of Solnhofen lithographic limestone (Lower Tithonian, Bavaria, Germany). (Fossil-Lagerstätten, Nr. 6). *Neue Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhanlungen*, Stuttgart 135: 1-18.

Barthel K. W., Swinburne N. H. M. & Morris S. C. 1990. — *Solnhofen. A study in Mesozoic palaeontology*. Cambridge University Press, 213 p.

Baudoin R. 1957. — Les pellicules flottantes d'algues et de bactéries, et leur rôle dans la dispersion des arthropodes aériens de petite taille. *Comptes Rendus de la Société de Biogéographie* 296-297 : 47-52.

Bellan-Santini D., Dauvin J.-C. & Bellan G. 1994. — Analyse de données en écologie benthique : utilisation de la méthode de l'analyse de parcimonie. *Oceanologica Acta* 17 (3) : 331-340.

Bernouilli B. & Jenkyns H. C. 1970. — A Jurassic basin: the Glasenbach Gorge, Salzburg, Austria. *Verhandlungen Geologische B.-A Jahrhang 1970*, 4: 504-531.

Bernouilli B. & Renz O. 1970. — Jurassic Carbonate facies and new Ammonite faunas from Western Greece. *Eclogae Geologicae Helvetica* 63 (2): 573-607.

Bode A. 1953. — Die Insektenfauna des Oster Ostniedersächsischen oberen Lias. *Palaeontographica* (A) Stuttgart 103 (1-4): 1-375.

Bontes A. 1941. — Contribution à l'étude du Jurassique de la bordure septentrionale du Bassin de Paris. *Bulletin des Services de la Carte géologique de France et des Topographies souterraines* 42 (205) : 1-440.

Brachert Th. C. 1987. — Makrofossilführung der "Siemensi-Geoden" (Mittlerer Lias Epsilon, Unteres Toarcium) von Kerkhofen/Oberpfalz (Bayern): Neue Insekten und Pflanzenfunde. *Geologische Blatter NO-Bayern*, Erlanger 37 (3-4): 217-240.

Busson G. & Noël D. 1972. — Sur la constitution et la genèse de divers sédiments finement feuilletés (« laminites »), à alternances de calcaire et de matière organique ou argileuse. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Paris (D) 274 : 3172-3175.

Cayeux L. 1939. — Phosphates de chaux sédimentaires de France. *Étude des Gites minéraux de la France* 1 : 349 p.

Darlu P. & Tassy P. 1993. — *Reconstruction phylogénétique : concepts et méthodes*. Collection « Biologie théorique », Masson (publ.), Paris, 245 p.

Deflandre G. 1959. — Sur les nannofossiles calcaires et leur systématique. *Revue de Micropaléontologie* 2 (3) : 127-152.

Deflandre G. & Dangeart L. 1938. — *Schizosphaerella*, un nouveau microfossile méconnu du Jurassique moyen et supérieur. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Paris 207 : 115-117.

Delsate D., Hentotay M. & Godefroit P. 1992. — Présence d'insectes dans le Toarcien inférieur de la Belgique. *Bulletin de la Société belge de Géologie*, Bruxelles 100 (1-2) : 147-153.

Gabilly J. 1976. — Le Toarcien à Thouars et dans le Centre-Ouest de la France. *Stratotypes Français*, CNRS (publ.), Paris 3 : 217 p.

Gall J. C. 1979. — Paléoécologie et paléoenvironnements de quelques schistes bitumineux. *Documents du Laboratoire de Géologie de la faculté des sciences de Lyon* 75 : 19-31.

— 1995. — Biofilms et mattes microbiennes : leur contribution à la sédimentogenèse. *Comptes Rendus de l'Académie de Sciences*, Paris 321 (II a) : 823-835.

Hallam A. 1967. — An environmental study of the Upper Domerian and Lower Toarcian in Great Britain. *Philosophical Transactions Royal Society* (B). Biological Section, London (178) 252: 393-445.

Handlirsch A. 1939. — Neue Untersuchun gen über

die fossilen Insekten mit Ergänzungen und Nachträgen sowie Ausblücken auf Phylogenetische, Palaeogeographische und allgemeine Biologische Probleme. *Annalen der Naturhistorischen Museum*, Wien 49: 1-240.

Hanzo M. 1978. — À propos de nodules carbonatés du Toarcien inférieur de la région de Bettembourg (grand-duché de Luxembourg). *Congrès national des Sociétés savantes, Sciences*, Nancy 103 (4) : 343-349.

Kauffman E. G. 1978. — Benthic environments and paleoecology of the Posidonien-schiefer (Toarcian). *Neue Jahrbuch für Geologie und Paläontologie Abhandlungen*, Stuttgart 157: 18-36.

Keupp H. 1977. — Ultrafazies und Genese der Solnhofener Plattenkalke (Oberer Malm, Südliche Frankenalb). *Abhandlungen der Naturhistorischen Gesellschaft*, Nürnberg 38: 1-128.

Lambshead P. J. D. & Paterson G. L. J. 1986. — Ecological cladistics – an investigation of numerical cladistics as a method for analysing ecological data. *Journal of Natural History* 20: 895-909.

Lang W. D. & Spath L. F. 1926. — The Black Marl of Black Ven and Stonebarrow in the Lias of the Dorset Coast. *Quartely Journal of the Geological Society*, London 82 (2): 144-187.

Masselot G., Nel A., Thomas A. & Nel J. 1997. — Parcimonie de Wagner et biomonitoring de cours d'eau : application au bassin de la Risle (Normandie, France). *Annales de la Société Entomologique de France*, N.S. 33 (3) : 237-258.

Nel A. 1989. — Les Gyrinidae fossiles de France (Coleoptera). *Annales de la Société Entomologique de France*, N.S. 25 (3) : 321-330.

Nel A., Martínez-Delclòs X., Paicheler J.-C. & Henrotay M. 1993. — Les « Anisozygoptera » fossiles. Phylogénie et classification (Odonata). *Martinia*, numéro hors-série 3 : 1-311.

Noël D. 1972. — Nannofossiles calcaires de sédiments jurassiques finement laminés. *Bulletin du Muséum national d'Histoire naturelle*, Paris (3), n° 75, Sciences de la Terre, 14 : 95-155.

O'Brien N. R. 1990. — Significance of lamination in Toarcian (Lower Jurassic) shales from Yorkshire, Great Britain. *Sedimentary Geology* 67: 25-34.

Oschman W. 1994. — Adaptative pathways of benthic organisms in marine oxygen-controlled environments. *Neue Jahrbuch für Geologie und Paläontologie Abhandlungen*, Stuttgart 191: 393-444.

Prager E. J. & Ginsburg R. N. 1989. — Carbonate nodule growth on Florida's Outer Shelf and its implications for fossil interpretations. *Palaios* 4: 310-317.

Rioult M. 1964. — Sur un mode particulier de fossilisation des Schizosphères (Algues microplanctoniques jurassiques) et sur la glauconie bajocienne du Calvados. *Bulletin de la Société Linnéenne de Normandie* 10 (5) : 24-38.

— 1968. — *Contribution à l'étude du Lias de la bordure occidentale du Bassin de Paris*. Thèse de Doctorat d'État, université de Caen, n° CNRS AO 1789, 565 p.

Seilacher A. 1990. — Die Holzmadener Posidonienschiefer. Entstehung der Fossillagerstärte und eines Erdölmuttergesteins: 107-131, *in* Weidert W. K. (ed.), *Klassische Fundstellen der Paläontologie*, 2. Golschneck-Verlag, Korb.

Tillyard R. J. 1925. — The British Liassic dragonflies. *British Museum Fossil Insects*, London 1: 1-39.

Urbain P. 1951. — Recherches pétrographiques et géochimiques sur deux séries de roches argileuses, *in Mémoires pour servir à l'exploitation de la Carte géologique de la France*. Secrétariat d'État à la Production industrielle, Paris, 278 p.

Viohl G. 1990. — Solnhofen Lithographic Limestones: 285-289, *in* Briggs D. E. G. & Crowther P. R. (eds), *Palaeobiology, a synthesis*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, London, Edinburgh, Boston, Melbourne.

— 1992. — Taphonomie des calcaires lithographiques de Solnhofen (Jurassique supérieur, Allemagne) et comparaison avec d'autres calcaires lithographiques : 15-17, *in* Gall J.-C. & Grauvogel-Stamm L. (eds), *Taphonomy: Processes and Products*, European Palaeontological Association Workshop, Strasbourg, June, 26-27, 1992.

Whalley P. E. S. 1985. — The systematics and palaeogeography of the Lower Jurassic insects of Dorset, England. *Bulletin of the British Museum Natural History (Geology)* 39 (3): 107-187.

Wollanke G. & Zimmerle W. 1990. — Petrographic and geochimical aspects of fossil embedding in exceptionally well-preserved fossil deposits. *Mitteilungen Geologische-Paläontologische Institut Universität*, Hamburg 69: 77-97.

Zeuner F. 1962. — Fossil insects from the Lower Lias of Charmouth, Dorset. *Bulletin of the British Museum Natural History (Geology)*, London 7: 155-171.

Soumis pour publication le 24 février 1997 ;
accepté le 15 janvier 1998.